

台风利奇马（1909）海温变化特征分析*

李肖霞^{1,2} 张雨潇¹ 曹晓钟¹ 张志龙^{1,3}

1 中国气象局气象探测中心, 北京 100081

2 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030

3 唐山市丰南区气象局, 唐山 063300

摘要 本文采用多源卫星融合数据、海洋气象漂流观测仪直接测量数据、Argo 浮标的数据以及 HYCOM 分析数据集, 分析 2019 年超强台风利奇马过境时海面温度 (SST) 以及海温垂直剖面的时空变化。结果表明, “利奇马”过境前后, SST 最大降温可达 5°C 以上, 并且降温区域集中在台风路径的右侧; “利奇马”过境导致近表层与次表层水体的垂直混合, 次表层水体被加热, 使混合层深度增加, 深层海水温度升高。通过各类数据分析, 发现“利奇马”过境后引起的 SST 降温核心区域的形成滞后于“利奇马”台风中心区域约 1~2 天。在各类数据的对比分析中, 由于海洋气象漂流观测仪的数据是直接测量的, 且采样频次高, 能够更加细致和准确的捕捉到温度的变化, 且可以作为用于卫星数据校正的重要参考。另外, 不同海洋区域的降温还与海洋环境有关, 台风靠近黑潮, 降温主要集中在混合层, 台风远离黑潮, 降温可以延伸到温跃层。

关键词 海面温度; 多源卫星融合数据; 分析数据集; Argo 浮标; 漂流观测仪; “利奇马”

文章编号: 中图分类号 P47 文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

The Analysis of Sea Temperature Variation in Response to Typhoon

Lekima (1909)

Li Xiaoxia^{1,2} Zhang yuxiao¹ Cao Xiaozhong¹ Zhang Zhilong^{1,3}

1 Meteorological Observation Center of CMA, Beijing 100081

2 Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030

3 Fengnan District Meteorological Bureau of Tangshan City, Tangshan 063300

收稿日期 2020-12-22 网络预出版日期

第一作者 李肖霞, 女, 1981 年出生, 正高工, 主要从事海洋气象观测研究工作。Email:lxao@cma.gov.cn

通讯作者 曹晓钟, Email:caoxzh@126.com

资助项目 国家重大科学仪器设备开发专项-海洋气象漂流观测仪开发及应用(2014YQ110787)、上海台风研究基金项目-海洋观测要素对台风响应的特征研究(TFJJ202008)

Funded by National Major Scientific Instrument and Equipment Development Special Project - Drifting Buoy of Marine Meteorological Observation development and application (2014YQ110787), Shanghai Typhoon Research Fund project - marine meteorological element to typhoon response (TFJJ202008)

Abstract In this study, multiple-source satellite data, high frequency data directly measured by marine meteorological drift buoy, Argo floats data and HYCOM analysis dataset were used to analyze the temporal and spatial variation of Sea Surface Temperature (SST) and vertical sea water temperature profile during the process of super typhoon Lekima (1909). The results showed that the maximum SST decrease could reach above 5°C after “Lekima”, the cooling area was more concentrated on the right side of typhoon’s track. “Lekima” resulted in the vertical mixing of near surface water and subsurface water column, and subsurface water column was heated, which increased the depth of the mixed layer and temperature of the deep water. According to the data mentioned above, it was found that the emergence of main SST decreased region was 1-2 days later than the appearance of “Lekima” center area. Among all data, marine drift buoy data could describe the variation in SST more accurately, and could be used as a reference to verificate satellite data, as the drift buoy could directly measure SST in high frequency. Moreover, the cooling effect in different marine region also depended on the marine environment. When “Lekima” was closer to Kuroshio, the cooling effect was concentrated in the mixed layer. On the contrast, when “Lekima” was far from Kuroshio, the cooling effect could extend to the thermocline.

Key words Sea surface temperature; Multiple-source satellite data; Analysis datasets; Argo float; Drifting Buoy of Marine Meteorological Observation; “Lekima”

1 引言

西北太平洋是全球台风发生频率最高、强度最强的地区，而我国沿海地区紧邻太平洋西北部，我国每年因台风造成的直接经济损失约占年 GDP 的 0.4%（雷小途等，2009）。台风过境前后，海面温度（SST）以及海温垂直剖面都会发生显著的变化，而海温的变化又会影响台风的路径与强度，因此开展台风过程中 SST 以及海温垂直剖面的特征研究，对台风预报具有十分重要的意义。

台风产生于 SST 较高的海域，较高的 SST 有利于增加近海表面水汽和潜热通量（Zhang, et al, 2020），温暖的海水以热通量形式提供台风生成所需的能量。Cione 等（2003）通过机载式海水测温仪（AXBT）和浮标观测数据，分析了飓风内部环境与周围海洋环境的海温变化情况，研究表明，在一定条件下，飓风内部海温变化是影响其强度变化的重要因素。台风过境会带来显著的 SST 降低，研究台风引起的 SST 降低也是台风动力学和台风预报的一个重要方面（朱建荣等，1997）。SST 降温的主要原因是由于卷挟混合过程造成的表层暖水和次表层冷水的混合（Prince,1981；朱建荣，1997;Jacob, 2000）。台风过境所引起的 SST 降幅通常为 5-6°C（Wentz et al, 2000），在强台风的条件下，例如 2000 年第 4 号台风启德，由于强上升流的影响，底层海水上涌，海面降温可达 10.8°C（Chiang et al, 2011；Shang et al, 2008）。SST 对热带气旋的响应具有非对称性（朱建荣等，1995）。

前人研究表明,在北半球,台风路径右侧的 SST 降温更为强烈 (Wright, 1969; Price, 1981; 蒋小平等, 2008; 杨晓霞等, 2010; Wang et al, 2017; 陈彤彤等, 2017; 王琳艳等, 2017; 章敏超等, 2017; 牟平宇等, 2018; Wu et al, 2019; Guo et al, 2020)。台风过境后同时也会对海洋内部结构产生一定影响,其中最为显著的是混合层深度、混合层温度、混合层盐度的变化 (张志伟, 2019)。这是由于台风过境时,海洋内部会产生“热泵”和“冷抽吸”作用 (陈大可等, 2013; Emanuel, 1986)。“热泵”作用是指台风过境后,在 SST 恢复的过程中,表层以下的热异常被保留了下来,通常表现为海洋温跃层的下降;“冷抽吸”作用是指台风过境后,台风残留的气旋式风应力能够引起海洋温跃层的强烈抬升现象。前人研究表明,台风能加深混合层深度,并使混合层温度降低 (Price, 1981; Emanuel, 1999; Jacob et al, 2000)。台风强度越大、离台风中心越近,混合层深度加深越大,并且台风对混合层深度的持续影响可达七天以上 (刘子龙, 2015)。王冠琳等 (2019) 利用 Argo 数据研究了台风凯萨娜过后海洋内部响应特征,通过分析发现台风引起了明显的垂向混合和泵吸,改变了海洋内部的水体分布,导致了 SST 的下降。

在海洋环境下,特别是强台风天气过程中,海洋气象及水文要素实测数据有限,因此可综合多源数据,相互融合、相互补充,对台风及其引起的海洋环境变化进行较为全面、深入、准确的分析。本文选取 2019 年超强台风利奇马过境期间,海洋气象漂流观测仪的直接测量数据、多源卫星融合数据、Argo 浮标数据以及 HYCOM 分析数据集,对台风过境前后 SST 以及垂直海温的时空变化特征进行分析。

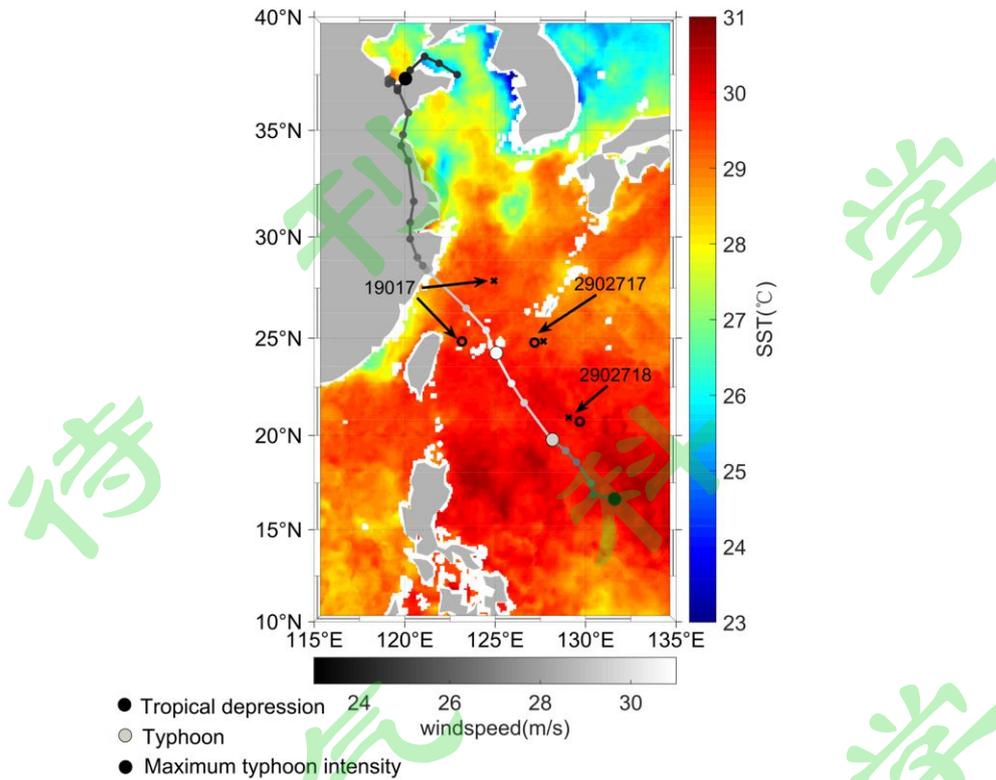


图 1 台风利奇马强度、路径与形成热带低压前 1 天（2019 年 8 月 3 日）海面温度。两个 Argo 浮标的站号分别为 2902717 与 2902718，漂流观测仪站号为 19017。圆圈与×号分别表示在台风利奇马生成前和 8 月 13 日降低为热带低气压时 Argo 浮标与漂流观测仪所处的位置。

Fig. 1 The intensity and track of typhoon Lekima and Sea surface temperature 1 day before (August 3, 2019) tropical depression. The station numbers of the two Argo floats are 2902717 and 2902718, and the drift buoy station number is 19017. The circles indicate the location of Argo buoys and drift buoy before the typhoon Lekima forms, and × indicates the location of Argo buoys and drift buoy when the typhoon Lekima drops to tropical depression on August 13.

2 资料和数据来源

2.1 超级台风利奇马

2019 年超级台风利奇马登陆强度大、陆地滞留时间长、影响范围广，对我国沿海地区造成了严重的灾害损失。图 1 展示了“利奇马”移动路径、中心海面风速以及形成热带低气压前一天（2019 年 8 月 3 日）的平均 SST。“利奇马”于世界时 8 月 4 日 6 时在吕宋岛以东 950km 的洋面上形成热带低气压（经纬度为 17.4 N,131.9 E，最大风速为 15m/s），形成后向西北方向发展，于 8 月 4 日 9 时发展为热带风暴（经纬度为 17.1 N,131.5 E，最大风速为 18m/s），8 月 6 日 21 时增强为台风（经纬度为 19.8 N,128.1 E，最大风速为 33m/s），8 月 7 日 15 时

达到超强台风级别（经纬度为 21.7°N, 126.6°E，最大风速为 52m/s），8月8日12时达到最大风速 62m/s（经纬度为 24.4°N, 125.0°E），8月9日19时登录浙江温岭（经纬度为 28.2°N, 121.5°E，最大风速为 52m/s），8月10日12时减弱为热带风暴（经纬度为 30.7°N, 120.3°E，最大风速为 23m/s），8月13日0时减弱至热带低压（经纬度为 37.2°N, 119.7°E，最大风速为 16m/s）。

2.2 “利奇马”路径数据

台风路径数据来自中国气象局热带气旋资料中心最佳路径数据集，同时还给出了台风中心的风速和气压等信息。中国气象局热带气旋资料中心提供 1949 年以来西北太平洋海域热带气旋每六小时的位置和强度。2018 年后登陆我国的台风，在其登录前 24 小时及在我国陆地活动期间，最佳路径时间频率为每三小时一次（数据下载与说明见 [http://tcdata.typhoon.org.cn/\[2020-09-01\]](http://tcdata.typhoon.org.cn/[2020-09-01])）。

2.3 多源卫星融合数据

多源SST数据是将卫星微波传感器与红外传感器观测数据融合，再进行最优插值后得到的海面温度(OISST)，数据为日平均SST，时间分辨率为日，空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 。卫星微波传感器包括热带测雨卫星微波成像仪（TMI），改进微波扫描辐射计（AMSR-E、AMSR-2），偏振辐射计（WindSat）和全球降水测量卫星微波成像仪（GMI）；卫星红外传感器包括中分辨率成像光谱仪（MODIS）和可见光红外成像辐射仪（VIIRS）；数据由遥感系统（Remote Sensing Systems）提供（数据说明与下载见 www.remss.com [2020-09-01]）。

2.4 海洋气象漂流观测仪与Argo浮标的观测数据

海洋气象漂流观测仪（Drifting Buoy of Marine Meteorological Observation, DBMMO）是由我国自主研发的海洋气象移动观测设备，该设备与国家级业务观测站的设备进行过对比，数据相关性较好，可长时间提供稳定可靠的气压、气温、海温、盐度以及风向、风速等观测数据（曹晓钟等，2019），且时间间隔为10分钟，可以更好地研究SST在台风期间的变化特征。该仪器布放后漂浮在海表面，目前布放数量不多，台风利奇马在海面移动期间，正好有1个海洋气象漂流观测仪在“利奇马”附近与其相遇。

为了分析海洋深层温度的变化，我们使用地转海洋学实时观测阵（Argo浮标）的海洋温度剖面观测数据，该数据由中国Argo实时资料中心提供（数据说明与下载见 <http://www.argo.org.cn> [2020-09-01]）。在“利奇马”过境期间，恰有两个Argo浮标在其移动路径附近。

2.5 分析数据集

由于海上实测数据较少，选取混合坐标海洋模型（HYCOM）分析数据集进行补充。HYCOM分析数据集长期业务化运行，提供了全球长时间序列的SST与0-5000m（第一层为0m）海温剖面数据等要素，空间分辨率为 $0.08^{\circ}\times 0.08^{\circ}$ ，时间分辨率为3小时，该数据集时间分辨率低于现场实测漂流观测仪数据（数据说明与下载见<https://www.hycom.org> [2020-09-01]）。

3 海面温度响应特征分析

3.1 多源卫星融合数据OISST

根据OISST所提供的日平均SST（见图2），以及相对于8月4日的SST变化分布图（见图3），在“利奇马”达到台风强度前，吕宋岛以东海域SST较高，温度在 29.0°C 以上，最高处可达 31.0°C （见图2a），高海温有利台风形成与加强，这是因为高SST更易产生对流并加热海面上的空气，为“利奇马”的加强创造条件。“利奇马”经过该区域，迅速加强，到8月5日18时已经加强为强热带风暴级别。随着“利奇马”逐渐北上增强，SST随着台风路径逐渐降低，降温区域也逐渐扩大。8月8日，在台风移动路径中心温度最低达 24.0°C ；8月13日，“利奇马”到达山东，减弱为热带低气压，黄海、渤海海域大幅降温，最低SST为 23.0°C ，而吕宋岛以东海域，SST开始逐步回升。

如图3所示，相对8月4日，8月7日吕宋岛以东海域出现一个较大降温区域。随着“利奇马”强度增大，8月8日SST最大降低温度达到最大，最大降温为 5.2°C 。在“利奇马”到达东海海域前，黄海、东海北部海域SST较8月4日，均有所升高，平均增幅约 1.0°C 。8月9日12时，“利奇马”即将登陆浙江温岭，降温区域扩大至东海海域，路径后方最大降温 5.2°C 。8月10日，“利奇马”移动至东海海域，东海海域SST出现大范围降低，最大降温幅度 4.5°C 。8月13日，“利奇马”移动至渤海海域，黄海、渤海海域均受到“利奇马”影响，大面积海域出现降温，最大降温为 5.0°C 。至此，“利奇马”自形成至消散所引起的SST降低达到最大值。

从SST变化的总体情况来看，台风影响的降温区域呈现右偏趋势，即温度减小的核心区域在“利奇马”路径右侧，且在“利奇马”中心区域，SST降低幅度较低，“利奇马”所引起的SST降低核心区域，滞后于“利奇马”中心约1天，距离台风路径垂向距离约 $10\sim 40\text{km}$ （见表1），研究表明，热带气旋所造成海温冷却机制的临界风速为 4m/s （ 14.4km/h ），当风速低于临界值时，台风作用以横跨路径两侧的上升流作用为主，反之则以集中于路径右侧的混合作用为主（Prince,1981；陈彤彤等，2017；王琳艳等，2017）。由图1可知，“利奇马”8月4日形成热带低气压后，风速始终大于此临界速度，因此降温中心出现在移动路径右侧。

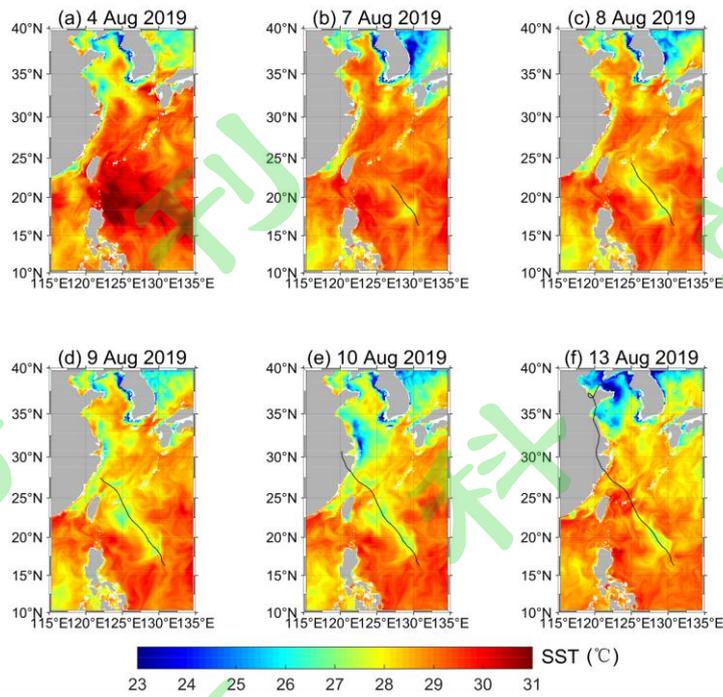


图 2 OISST 日海面温度分布 (黑线为台风移动路径)

Fig. 2 Distribution of daily sea surface temperature of OISST (The black line shows the path of the typhoon)

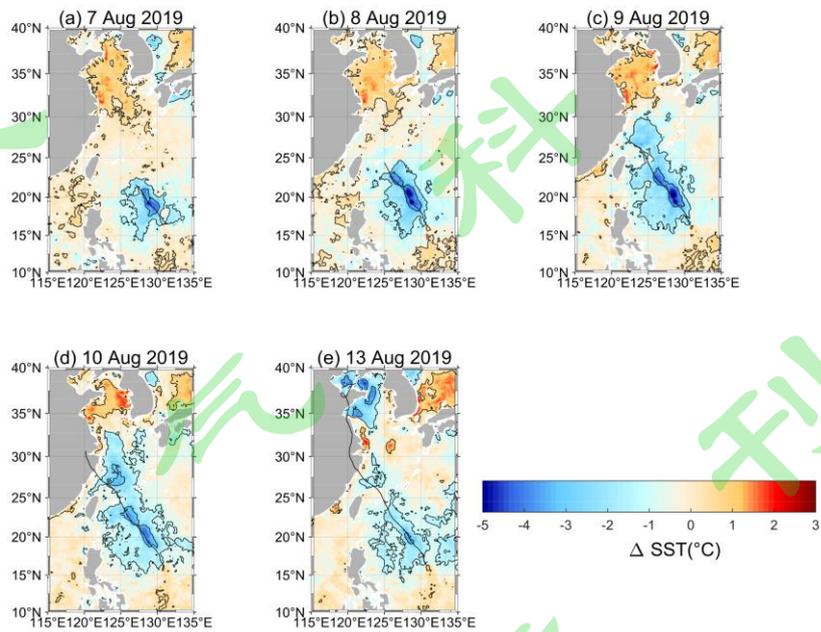


图 3 OISST 相对 8 月 4 日海面温度变化分布图 (海面温度异常; 黑线为台风移动路径)

Fig. 3 The variation distribution of sea surface temperature (SST) (Sea surface temperature anomaly minus SST on

August 4) of OISST (The black line shows the path of the typhoon)

表 1 降温中心与“利奇马”路径垂向距离 (OISST)

Table 1 Vertical distance between cooling area center and “Lekima” path (OISST)

日期	降温中心与“利奇马”路径垂向距离 (km)	相对于“利奇马”路径偏移方向
8月7日	-	-
8月8日	30	右偏
8月9日	40	右偏
8月10日	10	右偏
8月13日	-	-

3.2 HYCOM分析数据集

本研究分析了HYCOM所提供的海面温度及其异常演变情况 (见图4与图5), 相对于OISST数据中的SST分布情况, HYCOM所提供的SST数值略高。随着“利奇马”北上, SST降温区域随其移动路径逐渐扩大, 但7日、8日、10日、13日SST平均值、最大值、最小值均高于OISST。沿“利奇马”路径, 7日、8日、9日、10日、13日SST最大降低幅度分别为3.1℃、5.8℃、4.1℃、5.3℃、6.8℃。如图5所示, HYCOM所提供的 Δ SST数据在台风路径左侧的降温区域大于右侧, 呈现“左偏”特征, 降温核心距离台风路径垂向距离约70~500km (见表2)。

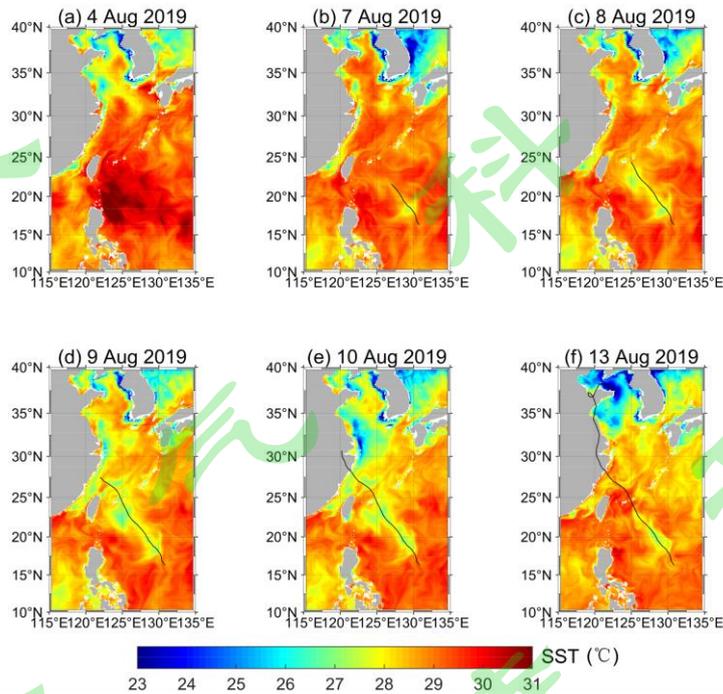


图 4 HYCOM 日海面温度分布 (黑线为台风移动路径)

Fig. 4 Distribution of daily sea surface temperature from HYCOM (The black line shows the path of the typhoon)

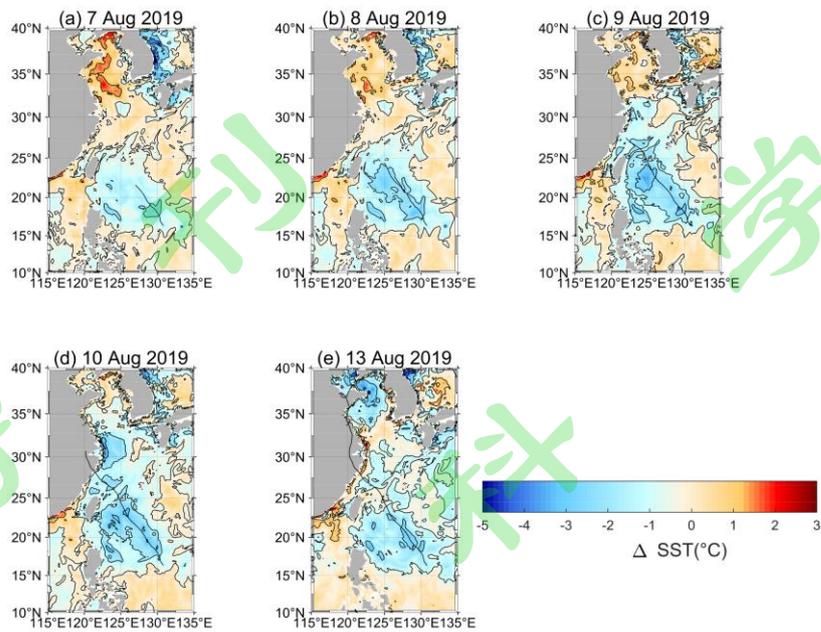


图 5 HYCOM 相对 8 月 4 日海面温度变化分布图（海面温度异常；黑线为台风移动路径）

Fig. 5 The variation distribution of sea surface temperature (SST) (Sea surface temperature anomaly ; minus SST on August 4) of HYCOM (The black line shows the path of the typhoon)

表 2 降温中心与“利奇马”路径垂向距离（HYCOM）

Table 2 Vertical distance between cooling area center and “Lekima” path (HYCOM)

日期	降温中心与“利奇马”路径垂向距离（km）	相对于“利奇马”路径偏移方向
8 月 7 日	-	-
8 月 8 日	70	左偏
8 月 9 日	150	左偏
8 月 10 日	500	左偏
8 月 13 日	-	-

3.3 漂流观测仪

国产漂流观测仪能够提供长期稳定的高频测量 SST 数据，图 6 为“利奇马”形成期间，距“利奇马”较近的站号为 19017 的漂流观测仪所测 SST 与 OISST、HYCOM 的变化对比情况，蓝色线条为漂流观测仪 19017 所测间隔 10 分钟的 SST 变化。三种数据的 SST 随时间演变一致，但 OISST 所提供的 SST 整体低于漂流观测仪测量的 SST。漂流观测仪在“利奇马”过境期间，从“利奇马”路径左侧移动至路径右侧，经纬度变化差异较大（见图 1），高频次的的数据提供了更为细致准确的 SST 变化趋势，而这些变化趋势在日平均数据中无法呈现：“利奇马”过境后，8 月 9 日 4 时 SST 达到最低值 27.2℃，维持至 06:40 后，由于仪器漂流，观测位置发生变化，06:50 至 07:50 小幅上升至 27.3℃，随后又降低至 27.2℃，

09: 50 至 18: 40, 均保持在 27.3℃, 此后 SST 呈现持续上升趋势; 8 月 10 日 9 时至 24 时与 8 月 11 日 10 时至 24 时, SST 稳定在 27.72℃ 与 28.04℃, 并在第二天 0 时至 9 时出现快速上升。

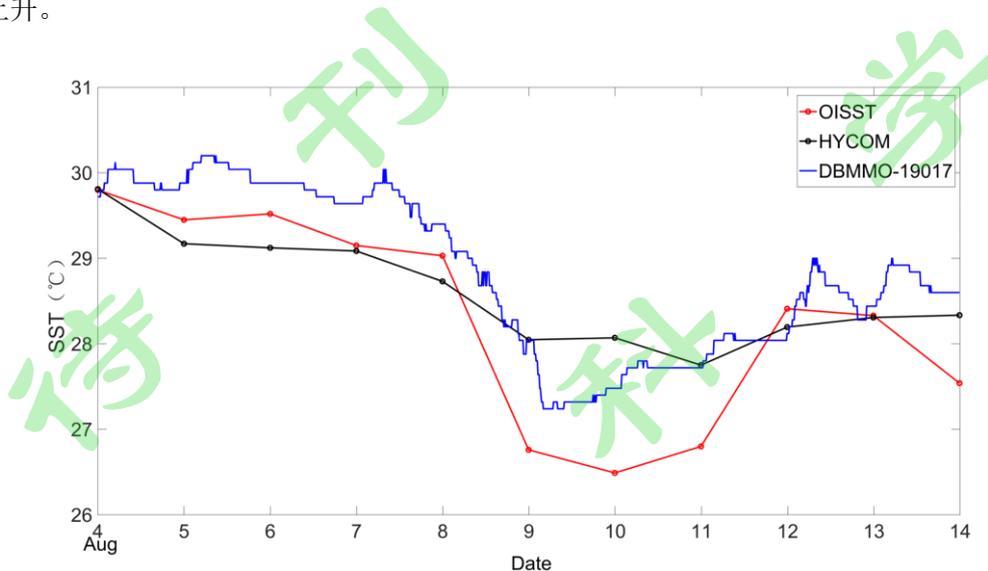


图 6 OISST、HYCOM 日平均 SST 变化与漂流观测仪 10mins 高频次 SST 变化 (漂流观测仪所在位置如图 1 所示)

Fig. 6 Variation of daily SST of OISST、HYCOM (red line and black line) and variation of SST of meteorological drift buoy in 10mins (The location of the drift buoy is shown in Figure 1)

3.4 Argo 浮标

本研究将 Argo 浮标外海实测数据与多源卫星融合数据 OISST 以及分析数据集 HYCOM 进行了比较 (见图 7)。

站号为 2902717 与 2902718 的 2 个 Argo 浮标位于“利奇马”移动路径右侧 (见图 1)。由图 7a、b 的 SST 变化可看出, 在“利奇马”来临前, Argo 浮标所测 SST 均在 29.0℃ 以上; 随着“利奇马”逐渐接近 Argo 浮标 2902717, SST 快速下降, 8 月 9 日 SST 下降至 28.0℃, 后因“利奇马”远离, SST 逐步回升。值得注意的是, 8 月 8 日“利奇马”处于最大强度, 并且移动至与 Argo 浮标 2902717 最近位置, 而 Argo 浮标 2902717 最大降温发生在 8 月 10 日, SST 最大降温出现滞后效应, 与上述多源卫星融合数据所呈现一致。Argo 浮标 2902718 的 SST 变化趋势与 Argo 浮标 2902717 类似, 与台风“利奇马”于 8 月 7 日达到最近距离, Argo 浮标 2902718 所测 SST 降温最大幅度出现在 8 日, 同样出现滞后性。Argo 浮标与 OISST、HYCOM 的 SST 变化趋势较为一致, 随着“利奇马”移动, SST 呈现先减后增趋势。

从图 7c、d 可看出, Argo 浮标 2902717 的 SST 最大变化发生在 8 月 10 日 (相对于 4 日下降 1.8℃), 并且后续 SST 变化幅度较小, 而 Argo 浮标 2902718 的 SST 最大变化发生在 8 月 8 日 (相

对于5日下降 1.9°C)，后续SST上升幅度较大。造成两个浮标海温变化差异的原因有以下两点：一是Argo浮标2902717靠近黑潮流域，海水整体温度较高，热量大，较为稳定，受“利奇马”影响后，SST波动幅度较低；二是Argo浮标2902718距“利奇马”较近，由图3可看出，其接近“利奇马”所引起降温的核心区域，因此Argo浮标2902717所测SST变化幅度小于Argo浮标2902718。

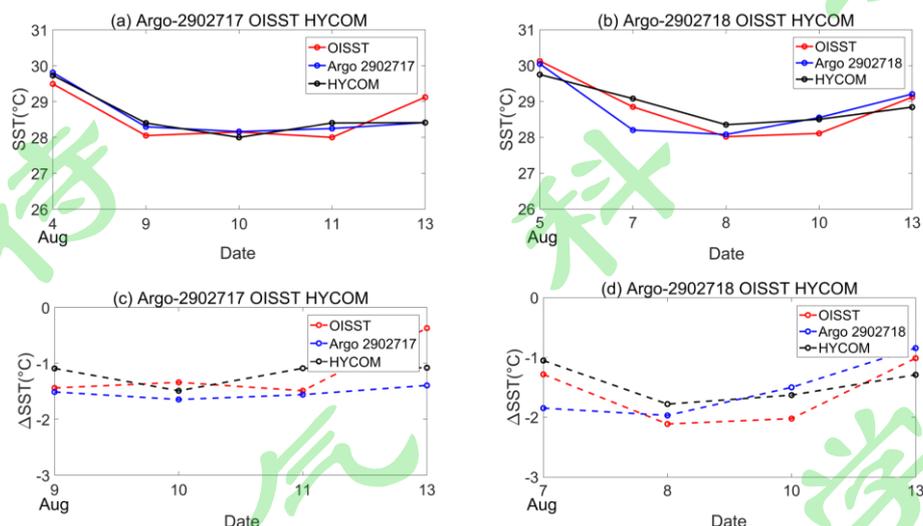


图7 a、b为Argo、OISST、HYCOM浮标SST变化；c、d为分别相对于8月4日与5日的SST变化（Argo浮标所在位置如图1所示）

Fig. 7 a and b represent the variation of SST of Argo floats, OISST and HYCOM ; c and d represent the SST anomaly (minus SST on August 4 and 5) (The location of the Argo floats are shown in Figure 1)

通过以上数据分析可知，SST沿“利奇马”移动路径具有降低的趋势，而路径前方东海海域SST在“利奇马”来临前却出现了小幅升温现象，导致这个现象可能有以下原因：一是由于“利奇马”过境导致强烈的海水垂向混合以及强大风应力的泵吸现象；二是受到黑潮的影响，黑潮起源于菲律宾以东的北赤道流的北向分支，具有流量大、流速强、高温、高盐等特征（张瑞冰等，2017），东海黑潮的高温海水加强了海面的潜热通量输送，因此对“利奇马”的强度增大起到促进作用。

4 海温垂直剖面响应特征

4.1 Argo浮标海温垂直剖面变化

本研究针对Argo浮标实测数据与HYCOM分析数据集在“利奇马”过境前后海水温度剖面变化情况进行了分析（见图8与图9）。8月5日，Argo浮标2902717所测水下0~20m海水温度约 29.8°C ，随着“利奇马”逐渐增强北上，该层海水温度快速降低，8月8日“利奇马”与该浮标相距最近，8月9日该层海水温度降至 28.3°C ，后因“利奇马”远离，8月10日后海水温

度逐渐回升。

本文采用如下定义描述混合层：比表层海水温度低 0.5°C 的水层，为混合层（Price 等，1986；Watanabe and Hibiya, 2002）。由表3可知，8月4日该浮标所测海域混合层深度约为水下30m，相比于8月4日，8月9日混合层深度增加约26.0m，随着“利奇马”远离，混合层深度逐渐减小，8月13日混合层深度减少至水下44.0m。由图8c可知，8月9日~13日混合层附近海温升高。8月9日该海域受“利奇马”的影响最为强烈，因此相对于8月4日混合层附近海温增幅最大，为 2.0°C 。8月9日混合层以下，60~85m处海温较8月4日稍有减小，幅度在 0.2°C 以内，85~288m处海温较8月4日呈增大趋势，幅度在 0.26°C 以内；8月10日海温剖面波动较大，不同深度下，海温变化较为频繁；8月11日与13日“利奇马”远离该海域，混合层附近海温较8月4日增幅较小，最大增加 0.8°C ，深层海水降温显著，8月13日在200m处海温降低 1.0°C 。HYCOM分析数据集所提供的水下0~50m海水温度与Argo浮标2902717较为接近，两类数据混合层深度变化趋势一致，先增大后减小，8月4日、9日，混合层深度与Argo浮标所测较为接近，8月10日，HYCOM所提供混合层深度大于Argo浮标所测深度，随后大幅回升，8月13日混合层深度为16m，较台风生成前减小13m，与Argo浮标测量的数据差异较大，差值高达28m。

Argo浮标2902718距离“利奇马”路径较近，由图9a，在“利奇马”过境期间，此浮标所测0~30m的海温有较为明显的变化：8月5日该层海水温度约为 30.0°C ，8月7日“利奇马”来临，海水温度骤降至 28.0°C ，此后“利奇马”逐渐远离，该层海水温度开始逐步回升，8月13日，海水温度上升至 29.0°C ，但仍低于“利奇马”来临前。8月5日至8月10日期间，混合层深度增加30.0m（见表4）。

表 3 2019 年 8 月 “利奇马” 期间 Argo 浮标 2902717 与 HYCOM 所测混合层深度

Table. 3 The depth of mix layer measured by Argo float 2902717 and HYCOM in August 2019 during “Lekima”

日期	Argo 浮标 2902717 混合层深度 (m)	HYCOM 混合层深度 (m)	Argo 浮标 2902717 相对 8 月 4 日混合层变化 (m)	HYCOM 相对 8 月 4 日 混合层变化 (m)
8 月 4 日	30	29	0	0
8 月 9 日	56	58	26	29
8 月 10 日	50	62	20	33
8 月 11 日	49	37	19	8
8 月 13 日	44	16	14	-13

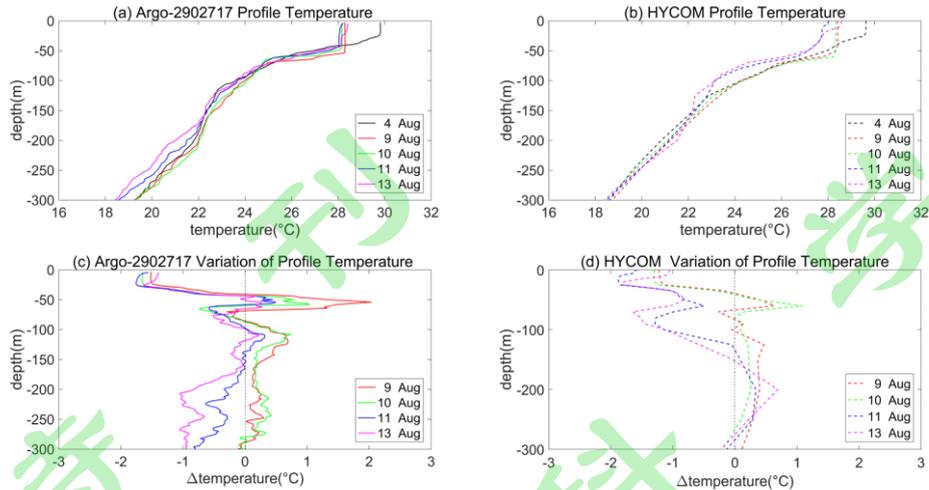


图 8 Argo 浮标 2902717 与 HYCOM 海水温度剖面变化 (a 和 b 为当日海温剖面; c 和 d 为相对于 8 月 4 日海温剖面变化; 浮标位置如图 1 所示)

Fig. 8 Vertical water temperature profile variation of Argo float 2902717 (a and b are daily vertical water temperature profile; c and d are water temperature variations relative to August 4; The location of Argo float is shown in Figure 1)

表 4 2019 年 8 月 “利奇马” 期间 Argo 浮标 2902718 和 HYCOM 所测混合层深度

Table. 4 The depth of mix layer measured by Argo float 2902718 and HYCOM in August 2019 during “Lekima”

日期	Argo 浮标 2902718 混合层深度 (m)	HYCOM 混合层深度 (m)	Argo 浮标 2902718 相对 8 月 5 日混合层变化 (m)	HYCOM 相对 8 月 5 日 混合层变化 (m)
8 月 5 日	38	37	0	0
8 月 7 日	62	36	24	-1
8 月 8 日	64	48	26	11
8 月 10 日	68	48	30	11
8 月 13 日	56	37	18	0

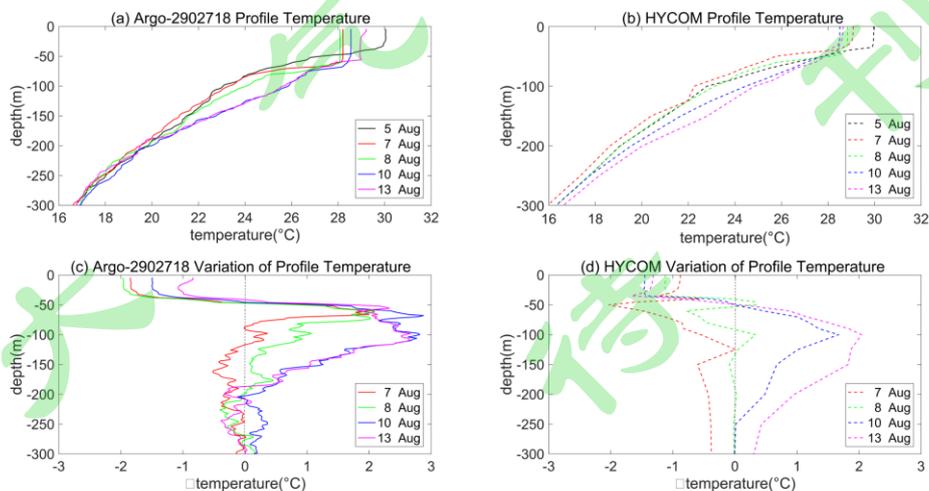


图 9 Argo 浮标 2902718 与 HYCOM 海水温度剖面变化 (a 和 b 为当日海温剖面; c 和 d 为相对于 8 月 5 日

海温剖面变化；浮标位置如图 1 所示)

Fig. 9 Vertical water temperature profile variation of Argo float 2902718 (a and b are daily vertical water temperature profile; c and d are water temperature variations relative to August 5; The location of the Argo float is shown in Figure 1)

4.2 HYCOM海温垂直剖面变化

图10给出了HYCOM在22.7°N的海温剖面图，8月4日“利奇马”中心位于该剖面南部，8月8日后“利奇马”中心移动至剖面北部，经纬度位置（黑色竖线）为8月8日0点“利奇马”中心所在位置，此海域受台风响应最为强烈，海温变化幅度显著高于其他海域。台风过境前，此处海面温度较高，表层海温为30.2°C，8月8日“利奇马”发展为超强台风，并到达黑色竖线附近海域，在强风作用下，下层海水上涌，表层、50~150m处海水温度显著降低（表层海温降低至28.6°C），混合层深度增加约22m。8月10日，“利奇马”远离该海域，但表层海水温度进一步降低至27.1°C，混合层深度增加约8m。8月13日，表层海温回升至27.9°C，仍低于“利奇马”来临前，此处海水温度分层显著，混合层深度约为水下8m，温跃层显著升高。根据HYCOM分析数据集所提供的海温剖面数据，其表层海温刻画较好，而深层海温对台风的响应较弱，变化幅度较小。

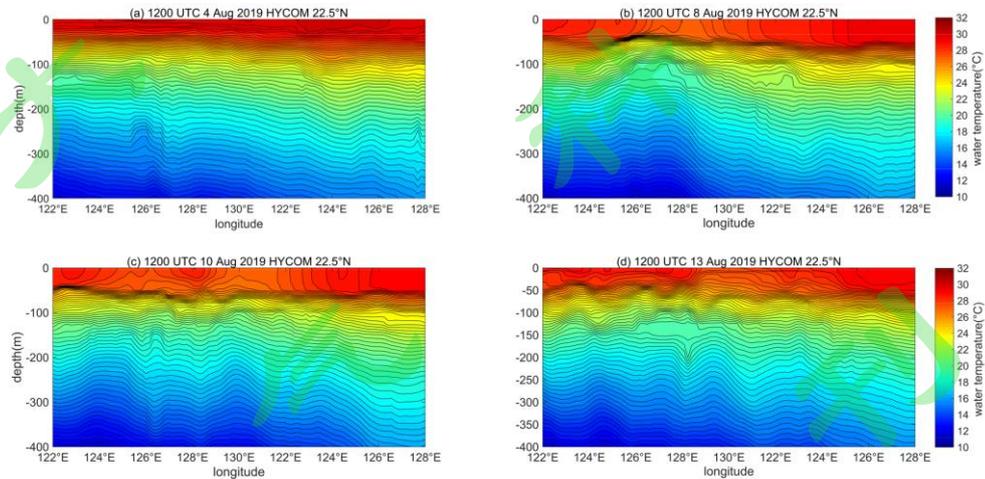


图 10 HYCOM 温度剖面

Fig. 10 HYCOM temperature profile

4.3 海温垂直剖面变化分析

海温垂直剖面数据分析显示（见图9c），“利奇马”来临后出现了“热泵”现象，这是由于“利奇马”过境带来较强的风应力，破坏了原有海水分层结构，使得海洋内部水体混合，近表层与次表层水体的垂直混合，次表层水体被加热，混合层深度增加，混合层以下海水温

度升高。分析表明，8月7日~13日海温剖面均出现升温，8月10日升温范围最大，最大增加2.5℃，海水温跃层进一步加深。HYCOM的海水温度剖面显示（见图8），8月10日表层海温为最低值（28.5℃）。8月7日、8日水下50~110m温度变化趋势与Argo浮标相反，相对于台风生成前，海温降低。8月10日、13日50m以下HYCOM海温所呈现的变化趋势与Argo浮标较为相似，但变化最大幅度低于Argo浮标。由表4可知，HYCOM所提供的8月5日~13日混合层深度变化幅度同样低于Argo浮标，仅8月8日、10日深度增加11.0m，其他时间与台风生成前保持一致。HYCOM分析数据集与Argo浮标实测数据相比，在海温剖面上出现差异并且响应较弱。

由于海洋内部对台风响应较为复杂，不同区域海温变化依赖于海洋环境本身差异，因此不同位置处的Argo浮标所观测到的响应特征会出现差异，靠近黑潮，海温变化在更集中在混合层（浮标2902717），远离黑潮，海温变化可以延伸到温跃层（浮标2902718）。由于Argo浮标时间分辨率较低，“利奇马”期间，时间间隔较长，数据具有一定局限性。而HYCOM分析数据集与Argo浮标数据相比，垂直海温剖面变化出现差异并且对台风的响应较弱，因此未来需要更高的时空分辨率数据来揭示海洋内部响应特征。

5 结论与讨论

本文使用多源卫星融合数据、分析数据集以及Argo浮标数据描述了“利奇马”的影响的SST和垂直海温剖面的变化情况，结论如下：

（1）多源SST数据分析显示，“利奇马”过境后最大降温可达5℃以上，中心区域的SST降幅较低，其所引起的SST降低最大值滞后于“利奇马”中心SST降低约1~2天。由多源卫星融合数据OISST所提供的数据可知，降温区域主要集中在“利奇马”移动路径右侧，“右偏”特征明显，降温核心距离台风路径垂向距离较近；而HYCOM分析数据集所提供的SST数据呈现“左偏”，降温核心距离台风路径垂向距离较远。

（2）多源卫星融合数据OISST、HYCOM分析数据集提供的SST数据与Argo浮标、海洋气象漂流观测仪实测数据变化趋势一致。漂流观测仪的数据由于采用直接观测且采样频次更高，能够更真实的捕捉到温度的变化。同时由于多源卫星融合数据OISST提供的SST比漂流观测仪实测SST低，并且时间分辨率较低，仅为日平均SST，可以考虑在多源卫星融合数据中将海洋气象漂流观测仪所测数据作为一个重要参考。

（3）通过Argo浮标以及HYCOM分析数据集所提供的海温垂直剖面数据分析，“利奇马”过境后，破坏了原有海水分层结构，加强了海洋内部水体的混合交换，混合层深度增

加,混合层以下海水温度升高。但由于海洋内部对台风响应较为复杂,不同区域降温依赖于海洋环境本身差异,因此不同位置处的 Argo 浮标所观测到的响应特征会出现差异,台风靠近黑潮,海温变化更集中在混合层,台风远离黑潮,海温变化可以延伸到温跃层。

(4) 本研究使用的实测海温数据来自 Argo 浮标与漂流观测仪观测,距离台风中心存在一定距离,台风中心附近区域实测数据仍然稀缺。未来台风研究中,可设计在台风高发海域提前布放漂流观测仪及锚碇浮标等设备,同时,可以采取多种手段,利用机载等方式投放海面要素观测传感器,从而获取更多台风实测 SST 以及剖面海温数据,进一步印证卫星数据、分析/再分析数据可靠性,提升台风观测能力。

参考文献

- 曹晓钟,李肖霞,雷勇,等. 2019. 国产海洋气象漂流观测仪在台风观测中的应用分析[J]. 气象, 45(10):1457-1463. Cao X Z, Li X X, Lei Y, et al. 2019. typhoon observation and analysis of domestic marine meteorological drift buoy experiment [J]. Meteor Mon(in Chinese), 45(10):1457-1463
- 陈德花,张玲,张伟,等. 2018. “莫兰蒂”台风致灾大风的结构特征及成因[J]. 大气科学学报, 2018, 41(05):118-127. Chen D H, Zhang L, Zhang W, et al. 2018. Structure characteristics and cause analysis of catastrophic wind caused by super typhoon Meranti [J]. Trans Atmos Sci(in Chinese), 41(5): 692-701
- 陈大可,雷小途,王伟,等. 2013. 上层海洋对台风的响应和调制机理[J]. 地球科学进展, 28(010):1077-1086. Chen D K, Lei X T, Wang W, et al. Upper ocean response and feedback mechanisms to typhoon[J]. Advance in Earth Science(in Chinese), 28(010):1077-1086
- 陈彤彤,周良明,王智峰,等. 2017. 台风“海鸥”期间南海北部波浪和 SST 变化特征分析[J]. 海洋湖沼通报, (004):1-11. Chen T T, Zhou L M, Wang Z F, et al. 2017. Surface Waves and SST Analsis in the Northern of South China Sea during Typhoon “Kalmaegi” [J]. Transactions of Oceanology and Limnology(in Chinese), (04):1-11
- Chiang T L, Wu C R, Oey L Y. 2011. Typhoon Kai-Tak: An ocean's perfect storm[J]. J Phys Oceanogr, 41(1): 221-233
- Cione J J, Uhlhorn E W. Sea Surface Temperature Variability in Hurricanes: Implications with Respect to Intensity Change[J]. Mon. wea. rev, 2003, 128(8, Part 2):1783-1796.

- Emanuel K A. 1986. An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part I: Steady-State Maintenance[J]. *J Atmos Sci*, 43(6):585-605
- Emanuel K A. 1999. Thermodynamic control of hurricane intensity[J]. *Nature*, 401(6754): 665-669
- Guo, J., Zhang, T., Xu, C. et al. 2020. Upper ocean response to typhoon Kujira (2015) in the South China Sea by multiple means of observation[J]. *J Oceanol Limnol*, 38(02):314-333
- Jacob S D, Shay L K, Mariano A J, et al. 2000. The 3D oceanic mixed layer response to Hurricane Gilbert[J]. *J Phys Oceanogr*, 30(6): 1407-1429
- 蒋小平, 钟中, 赵思楠, 等. 2008. 南海热带气旋引起的海表面温度变化特征分析[J]. *气象科学*, 28(06):614-618. Jiang X P, Zhong Z, Zhao S N, et al. 2018. The variation features of SST induced by tropical cyclones over SCS [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28(06):614-618
- 雷小途, 陈佩燕, 杨玉华, 等. 2009. 中国台风灾情特征及其灾害客观评估方法[J]. *气象学报*, 67(005):875-883. Lei X T, Chen P Y, Yang Y H, et al. 2009. Characters and objective assessment of disasters caused by typhoons in China [J]. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 67(5):875-883
- 刘子龙. 2015. 基于台风“康森”和“暹巴”研究西太平洋上层海洋对台风的响应特征[C]. 中国气象学会. 第32届中国气象学会年会 S23 第五届研究生年会. 中国气象学会, 192-215. Liu Z L. 2015. The study of response characteristics of upper ocean in the Western Pacific Ocean to typhoons based on typhoons “Conson” and “Chaba” (in Chinese)[C]. The 32nd Annual Meeting of Chinese Meteorological Society, S23, the 5th Annual Meeting of Graduate students. Chinese Meteorological Society, 192-215
- 牟平宇, 林霄沛. 2018. 台风“苏力”(2013)期间海洋上层温、盐及海平面异常变化特征[J]. *海洋湖沼通报*, (03):1-11. Mu P Y, Lin X P. 2018. Changes in Upper Ocean Temperature, Salt and Sea Level During Typhoon SOULIK(2013) [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology* (in Chinese), (03):1-11
- Price J F. 1981. Upper ocean response to a hurricane[J]. *J Phys Oceanogr*, 11(2): 153-175
- Price J. F., Weller R. A., Pinkel R. 1986. Diurnal cycling: Observations and models of the upper ocean response to diurnal heating, cooling, and wind mixing[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C7): 8411-8427

- Shang S, Li L, Sun F, et al. 2008. Changes of temperature and bio-optical properties in the South China Sea in response to Typhoon Lingling, 2001[J]. *Geophys Res Lett*, 35, L10602
- 王冠琳, 李大伟, 徐腾飞, 等. 2009. 上层海洋对台风"凯萨娜"(2009)的响应特征[J]. *海洋科学*, 043(009):1-11. WANG G L, LI D W, XU T F, et al. 2009. Upper ocean responses to Typhoon Ketsana (2009) [J]. *Marine Sciences (in Chinese)*, 043(009):1-11
- 王琳艳, 郁诚成, 吴克俭. 2017. 南海 SST 对台风过程响应分析[J]. *海洋湖沼通报*, (6):67-74. Wang Y L Yu C C Wu K J. 2017. Response of Sea Surface Temperature to Typhoon in South China Sea [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese)*, (6):67-74
- Wang Y D, Liu Q, Ma Y S. 2017. Upper ocean response to typhoon Megi (2010) [C]. *Iop Conference*, 52(1)
- Watanabe M, Hibiya T. Global estimates of the wind-induced energy flux to inertial motions in the surface mixed layer[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8):64-1-64-3.
- Wentz F J, Gentemann C, Smith D, et al. 2000. Satellite measurements of sea surface temperature through clouds[J]. *Science*, 288(5467): 847-850.
- Wright R. 1969. Temperature structure across the Kuroshio before and after typhoon Shirley[J]. *Tellus*, 21(3): 409-413
- Wu Z Y, Jiang C B, Chen J, et al. 2019. Three-Dimensional Temperature Field Change in the South China Sea during Typhoon Kai-Tak (1213) Based on a Fully Coupled Atmosphere-Wave-Ocean Model[J]. *Water*, 11(1)140
- 杨晓霞, 唐丹玲. 2010. 台风引起南海海表面降温的位置变化特征[J]. *热带海洋学报*, 29(04):26-31. YANG X X TANG D L. 2010. Location of sea surface temperature cooling induced by typhoon in the South China Sea [J]. *Journal of Tropical Oceanography (in Chinese)*, 2010, 29(04):26-31 (in Chinese)
- 章敏超, 郭碧云. 2017. 台风海葵 2012:利用卫星数据研究海气参数的变化[J]. *中国水运:下半月*, 17(08):234-238. Zhang M C, Guo B Y. 2017. Typhoon Haikui 2012: Using satellite data to study the variation of sea-air parameters [J]. *China Water Transport (in Chinese)*, 17(08):234-238
- 张瑞冰, 侯一筠, 刘亚豪. 2017. 黑潮与东海水交换研究[J]. *海洋科学*, 41(12):117-126. Zhang R B, Hou Y J, Liu Y H. 2017. The East China Seas exchange with the Kuroshio[J]. *Marine Sciences (in Chinese)*, 41(12):117-126

张志伟. 2019 西北太平洋上层海洋对台风响应的个例研究[J]. 海洋通报, 38(05):562-568.

Zhang Z W.2019. A case study of the response of northwest Pacific upper ocean to typhoon [J]. Marine Science Bulletin (in Chinese), 38(05):562-568

Zhang Z, Zhang W M, Zhao W J, et al. 2020. Radial Distributions of Sea Surface Temperature and Their Impacts on the Rapid Intensification of Typhoon Hato (2017) [J]. Atmosphere, 11(2), 128

朱建荣, 秦曾灏. 1995. 海洋对热带气旋响应的研究: I .海洋对静止,移速不同的热带气旋响应[J]. 海洋与湖沼, (02):146-153. Zhu J R, Qin Z H.1995. Study on the Response of Ocean to Tropical Cyclones I .The Response of Ocean to Stationary and Different Speed Tropical Cyclones[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica(in Chinese), (02):146-153

朱建荣, 秦曾灏. 1995. 海洋对热带气旋响应的研究:II.不同海洋热力结构下的情形[J]. 海洋与湖沼, 26(5):455-459. Zhu J R, Qin Z H. 1995. Study on the Response of Ocean to Tropical Cyclones II .The Case in the Different Ocean Thermal Structures[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica(in Chinese), 26(5):455-459

朱建荣,周健. 1997. 东中国海对热带气旋的响应[J]. 上海水务, 000(001):13-19. Zhu J R, Zhou J. 1997. Response to tropical cyclones of East China Sea[J]. Shanghai Water(in Chinese), 000(001):13-19